

盘腔进气位置对径向预旋系统的影响

张 凯, 王锁芳, 侯晓亭, 韦光礼

(南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 为减少径向预旋系统的流动损失,运用数值模拟方法对不同盘腔进气位置的径向预旋系统进行分析,结果表明:随着盘腔进气径向位置的增加,预旋喷嘴出口气流旋流比随之逐渐减小,径向预旋系统的温降系数及总压损失系数均随之逐渐增大。当旋转雷诺数等于 7.9×10^6 ,盘腔进气位置由低位向高位变化时温降系数最大可增加 525%,同时总压损失系数增加 3.93%。径向预旋系统内比熵增主要发生在预旋喷嘴和共转腔,约占系统总体比熵增的 80%。随着盘腔进气径向位置的增加,径向预旋系统总体比熵增降低,预旋喷嘴比熵增占比逐渐增大,共转腔比熵增占比逐渐减小。

关 键 词: 进气位置; 径向预旋; 温降系数; 压力损失; 比熵增

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Influence of air entraining position on radial pre-swirl system

ZHANG Kai, WANG Suofang, HOU Xiaoting, WEI Guangli

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To reduce the flow loss in radial pre-swirl system, numerical simulation method was used to analyze the radial pre-swirl system with different air entraining positions of the cavity. The results showed that the swirl ratio of air flow at the pre-swirl nozzle outlet decreased, the temperature drop coefficient and total pressure loss coefficient increased with the increase of the radial air entraining position. When rotational Reynolds number was 7.9×10^6 , the temperature drop coefficient increased by 525% and the total pressure loss coefficient increased by 3.93% when the air entrainment position changed from low to high. The specific entropy increment in the radial pre-swirl system mainly occurred in the pre-swirl nozzle and the co-rotating cavity, accounting for about 80% of the total specific entropy increment. With the increase of the radial air entraining position, the overall specific entropy increment decreased, and the specific entropy increment proportion of the pre-swirl nozzle increased. However, the specific entropy increment proportion of co-rotating cavity decreased.

Key words: air entraining position; radial pre-swirl; temperature drop coefficient; pressure loss; specific entropy increment

收稿日期:2019-09-24
基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0011-0037)
作者简介:张凯(1996—),男,硕士生,主要从事航空发动机空气系统研究。

引用格式:张凯,王锁芳,侯晓亭,等. 盘腔进气位置对径向预旋系统的影响[J]. 航空动力学报,2020,35(3):502-509. ZHANG Kai, WANG Suofang, HOU Xiaoting, et al. Influence of air entraining position on radial pre-swirl system[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3): 502-509.

预旋供气系统作为航空发动机空气系统的重要组成部分,给涡轮叶片提供冷却空气。其原理为冷气通过预旋喷嘴发生偏转并膨胀加速,使冷气的周向速度与涡轮盘转动方向一致,从而降低冷气相对于涡轮叶片的总温。为提高预旋系统的性能,国内外学者对预旋系统开展了大量研究。

Yan、Jarzombek、Lewis 等^[1-4]对轴向直导式预旋系统进行了数值与试验研究,主要探究了盘腔高度、盘腔进气预旋比及喷嘴径向位置对预旋系统流动与换热的影响。Javiya 等^[5]研究了叶栅型与孔型预旋喷嘴,得出叶栅型喷嘴流动特性较好的结论。Granovskiyy 等^[6]对径向预旋系统中预旋喷嘴处于不同轴向位置进行了分析研究,发现气流温降、压降趋于一致,而系统内流动结构差异很大。Elsadi 等^[7]研究发现径向预旋系统中盖板腔形状对预旋温降、流阻特性影响较小。刘高文等^[8]对孔型预旋喷嘴进行了研究,发现当预旋喷嘴长径比为 2.5 左右时,预旋效率最高。吴衡等^[9-10]根据数值计算结果,运用熵分析法对轴向盖板式预旋系统进行分析,研究发现供气孔处熵增最大。胡伟学等^[11]通过数值计算对预旋喷嘴的径向角度进行了分析研究,得出预旋喷嘴存在最佳径向角度的结论。王锁芳等^[12]对预旋喷嘴处于不同径向位置下的转静盘腔内的流动与换热进行了数值研究。侯伟韬等^[13]研究了不同盘腔进气预旋比及接受孔周向角度对转静盘腔内流动特性的影响,发现接受孔流量系数随着其周向倾角的增大而增大。林立等^[14]通过数值计算与试验对预旋喷嘴处于低位的转静盘腔内流动进行研究,并使用角动量系数对盘腔内流动特性进行表征。孙占东等^[15]通过试验研究了不同预旋角度和进气位置下轴向盖板式预旋系统内的流动特性,发现预旋进气角度与进气位置对共转腔内压力大小与分布产生重要影响。张建超等^[16]通过数值计算与试验研究了旋转雷诺数和无量纲质量流量对径向预旋系统温降特性的影响。余建军^[17]研究了喷嘴结构形式、接受孔个数对径向预旋系统流动的影响,并对径向预旋与轴向预旋系统流动特性进行对比分析。

国内外的研究表明喷嘴径向位置、喷嘴结构以及盘腔进气位置对预旋系统的流动与温降特性有非常重要的影响。国内外对于径向预旋系统的研究主要集中于预旋喷嘴结构以及接受孔等方面,而关于盘腔进气位置对径向预旋系统特性的影响则很少有学者研究,在径向预旋系统中冷气

经预旋喷嘴径向内流,再经共转腔径向外流,冷气流路与 U 型管路类似,与轴向预旋系统中冷气流路存在很大区别,因此很有必要研究盘腔进气位置对径向预旋系统的流动与温降的影响,为径向预旋系统结构优化设计提供参考。

1 模型及计算方法

1.1 计算模型

航空发动机径向预旋系统实物模型如图 1 所示,冷气经预旋喷嘴膨胀加速产生一定的周向速度,通过接受孔进入共转腔,先沿共转腔轴向流动而后径向外流进入供气孔,为涡轮叶片冷却提供冷却空气。

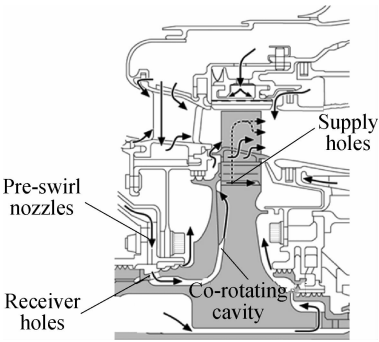


图 1 径向预旋系统结构

Fig. 1 Structure of radial pre-swirl system

对径向预旋系统进行适当简化,忽略封严对系统的影响。简化后径向预旋系统计算模型如图 2(a)所示,主要由进气腔、预旋喷嘴、预旋腔、接受孔、共转腔及供气孔构成。计算模型可分为静止域和旋转域,转静交界面为预旋腔的径向中间截面。根据模型的周期性,取径向预旋系统模型的 1/3 进行计算。在所取计算模型中,预旋喷嘴为 7 个,喷嘴预旋角度为 15°,接受孔及供气孔为 16 个。径向预旋系统的相关结构标识如图 2(b)所示,以供气孔所在位置半径 r_s 进行结构参数的无量纲化,表 1 中所提及的无量纲参数均为其与 r_s 的比值。以某型发动机盘腔进气所在位置半径 $r_n/r_s=0.55$ 为基准,保证预旋喷嘴、接受孔与共转腔的相对位置不变,分别取 $r_n/r_s=0.35,0.45,0.55,0.65,0.75,0.85,0.95$ 。预旋喷嘴长度 L_n 、预旋喷嘴直径 D_n 、接受孔长度 L_r 、接受孔直径 D_r 、共转腔外半径 b 、共转腔轴向长度 L 、共转腔轴向宽度 S 、供气孔直径 D_s 等径向预旋系统主要结构无量纲化尺寸如表 1 所示。

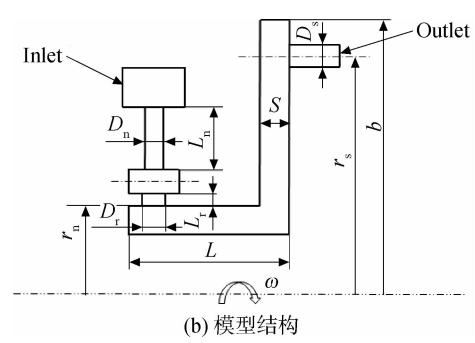
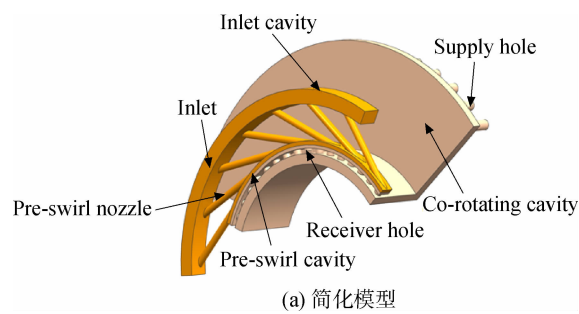


图 2 计算模型
Fig. 2 Computational model

表 1 无量纲尺寸
Table 1 Dimensionless size

无量纲参数	数值	无量纲参数	数值
D_n/r_s	0.017	L_r/r_s	0.025
L_n/r_s	0.176	D_r/r_s	0.039
S/r_s	0.049	L/r_s	0.363
b/r_s	1.072	D_s/r_s	0.025

1.2 网格划分与计算方法

如图 3 所示,使用商用软件 ICEM 对静止域和旋转域模型分别进行网格划分,计算域均采用非结构化网格,壁面设置边界层网格数量为 5 层,第 1 层网格高度距壁面 0.05 mm,网格增长率为 1.2。经计算验证,如图 4 所示,图中横坐标 Re_ϕ 为旋转雷诺数,纵坐标 ψ 为温降系数,壁面处 y^+ 值处于不同范围时,径向预旋系统温降系数(ψ)结果偏差在 0.9% 左右,影响相对较小。以文献 [11,16] 中壁面 y^+ 值为参考,本文计算模型壁面处 y^+ 控制在 30~150 之间。

选取网格数量为 40 万~180 万对模型进行网格无关性验证,径向预旋系统无量纲总压损失系数(ζ)随网格数量的变化趋势如图 5 所示。当网格数量超过 120 万后无量纲总压损失系数变化量很小,为节省计算资源,选取网格数量为 140 万。使用 CFX17.2 对模型进行三维稳态求解计

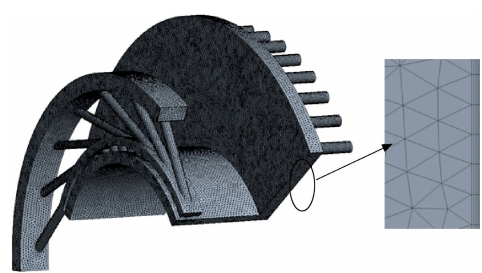


图 3 计算域及网格示意图
Fig. 3 Computational domain and grid

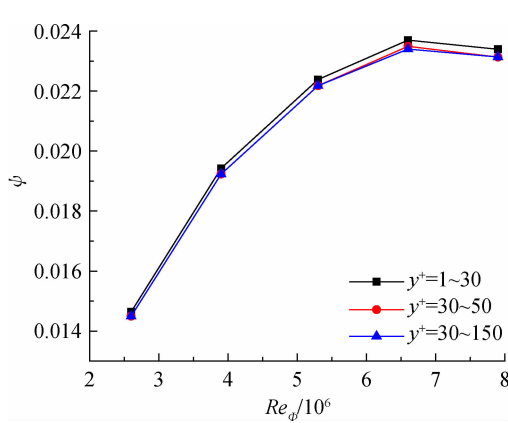


图 4 壁面不同 y^+ 值计算结果对比
Fig. 4 Comparison of computational results varying with y^+

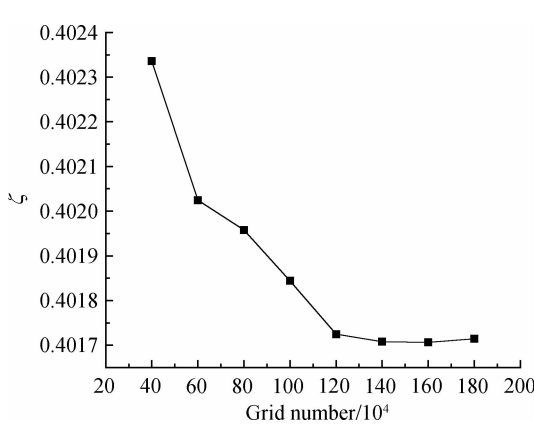


图 5 总压损失系数随网格数量变化
Fig. 5 Total pressure loss coefficient varying with grid number

算,本文计算模型与文献[16]中的模型均属于径向预旋系统结构,运用本文采用的网格划分与计算方法分别选用不同的湍流模型对文献[16]中的试验模型进行求解计算,由图 6 可知,renormalization group(RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型的无量纲温降(ΔT^*)计算值和试验值相差较小,故本文选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。

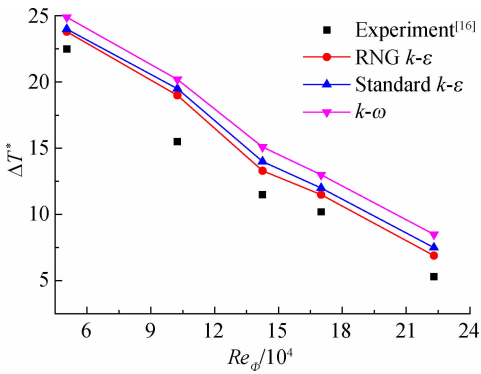


图 6 数值计算与试验对比

Fig. 6 Comparison of computational results and experimental data

1.3 边界条件

给定径向预旋系统进口总压为 1.3515 MPa, 总温为 703 K; 径向预旋系统出口给定静压为 0.795 MPa。旋转域角速度范围为 523.6 ~ 1570.8 rad/s。转静交界面采用固定转子相位法 (frozen rotor), 设置为 general grid interface (GGI)。所有固体壁面均设置为绝热无滑移。模型中周期面设置为周期性边界条件。冷气为可压缩性流体。

2 参数定义

2.1 温降系数

$$\psi = \frac{T_{in}^* - T_{out,rel}^*}{T_{in}^*} \tag{1}$$

其中 T_{in}^* 为冷气进口总温; $T_{out,rel}^*$ 为冷气出口相对总温。

2.2 无量纲温降

$$\Delta T^* = \frac{2c_p(T_{in}^* - T_{out,rel}^*)}{(\omega r_b)^2} \tag{2}$$

其中 c_p 为冷气的比定压热容, ω 为转盘旋角速度, r_b 为文献[16]中的计算模型接受孔进口径向位置。

2.3 总压损失系数

$$\zeta = \frac{p_{in}^* - p_{out,rel}^*}{p_{in}^*} \tag{3}$$

其中 p_{in}^* 为冷气进口总压; $p_{out,rel}^*$ 为冷气出口相对总压。

2.4 无量纲质量流量

$$C_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}}{\mu b} \tag{4}$$

其中 $\dot{m}$ 为径向预旋系统出口气流质量流量; μ 为

冷气动力黏度。

2.5 旋流比

$$S_r = \frac{v_\phi}{\omega r} \tag{5}$$

其中 S_r 为旋流比, v_ϕ 为冷气绝对周向速度; r 为冷气当地半径位置。

2.6 旋转雷诺数

$$Re_\phi = \frac{\rho \omega b^2}{\mu} \tag{6}$$

其中 ρ 为冷气密度。

2.7 比熵增

$$\Delta s = \frac{\int (s_d + s_{d'}) dV}{\dot{m}} \tag{7}$$

参考文献[18]中提出系统熵产为直接耗散熵产率 s_d 与湍流耗散熵产率 $s_{d'}$ 之和的体积积分, dV 为流体体积微元。则系统内单位质量流量流体通过系统内各结构元件的比熵增等于系统内部熵产率的体积积分与系统出口质量流量之比。

3 结果讨论与分析

3.1 盘腔内气流流动特性

当旋转雷诺数 $Re_\phi = 6.6 \times 10^6$ 时, 7 种盘腔进气位置下的计算模型转动域子午面流线图如图 7 所示, 当盘腔进气所在位置半径 $r_n/r_s = 0.35$ 时, 共转腔内出现 3 个涡系, 其中涡系 1 是由于气流冲击壁面使气流速度发生偏转, 涡系 2、3、4 是由于盘腔内气流相对速度较大, 在气流由轴向出流转为径向外流时, 在共转腔壁面处发生气流分离, 从而形成回流、旋涡。当盘腔进气所在位置较低时, 共转腔内气流速度分布不均匀, 在轴向出流时, 近上壁面处气流流速明显低于近下壁面; 径向外流时近左壁面处气流流速低于近右壁面处。随着 r_n/r_s 的增大, 气流相对速度减小, 接受孔出口处涡系减弱, 共转腔内涡系消失, 共转腔内的速度分布则较为均匀。

当旋转雷诺数 $Re_\phi = 6.6 \times 10^6$ 时, 转动域子午面的气流旋流比分布如图 8 所示, 在气流径向外流时, 气流周向速度会随着共转腔半径的增大而减小, 而共转腔当地线速度则随着共转腔半径的增大而增大。故当气流径向外流时共转腔内旋流比会随着共转腔半径的增加而减小。由于供气孔为轴向直通孔, 当气流流入供气孔后会趋于与供气孔同步转动, 故供气孔内气流旋流比为 1 左

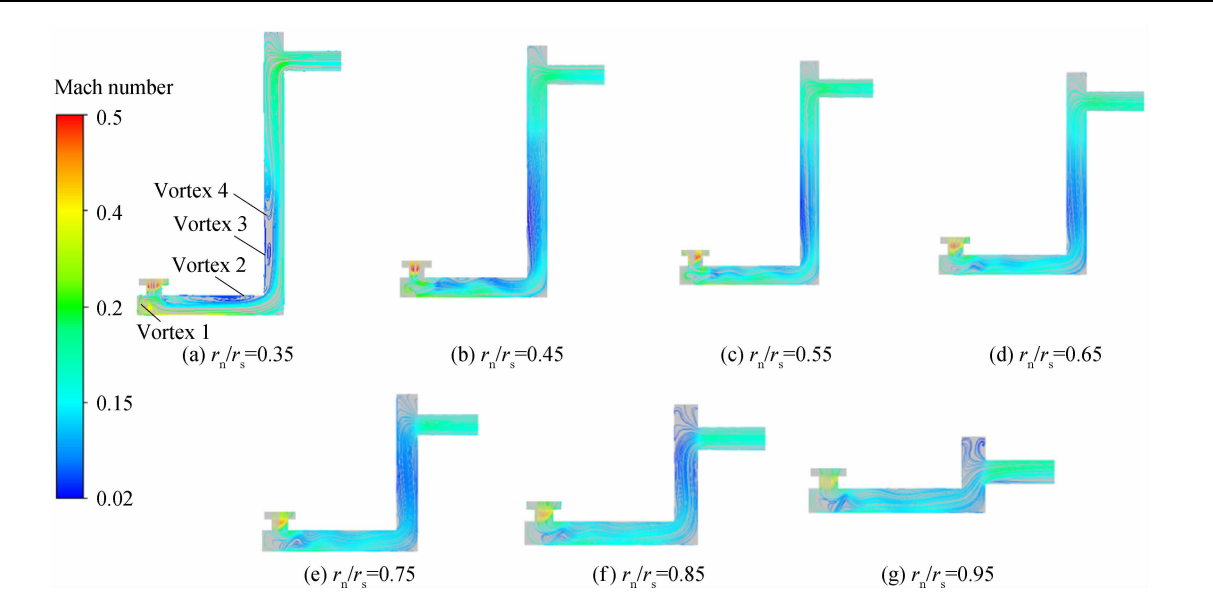


图 7 转动域内气流流线
Fig. 7 Streamlines in the rotating cavity

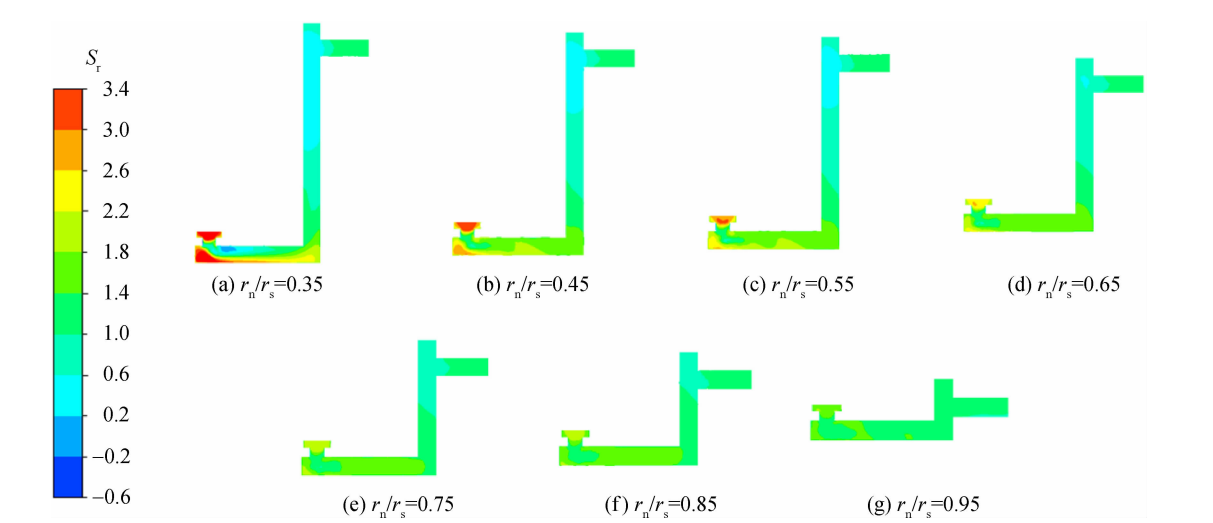


图 8 转动域内气流旋流比
Fig. 8 Swirl ratio of airflow in rotating cavity

右。当盘腔进气位置较低时,接受孔入口处气流旋流比远大于 1,而供气孔入口处气流旋流比则较小,约为 0.5,共转腔内气流旋流比变化较大;且在接受孔下游由于气流冲击壁面形成局部旋流比较大的区域。当盘腔进气位置较高时,整个共转腔内气流旋流比变化较小。而且随着 r_n/r_s 的增加,供气孔入口处气流旋流比逐渐增大。

图 9 为不同旋转雷诺数下无量纲质量流量随着盘腔进气位置的变化,在低旋转雷诺数下 ($Re_\phi = 2.6 \times 10^6, 3.9 \times 10^6$) 随着 r_n/r_s 的增加,径向预旋系统出口无量纲质量流量逐渐减小。这是由于随着 r_n/r_s 的增加,相邻接受孔周向距离增大,气流由转静腔流入接受孔的流通性变差导致

系统的流量减小。在高旋转雷诺数下 ($Re_\phi = 5.3 \times 10^6, 6.6 \times 10^6, 7.9 \times 10^6$) 随着 r_n/r_s 的增加,径向预旋系统进口无量纲质量流量趋于先增大再减小。因为在高旋转雷诺数下,随着 r_n/r_s 的增加,接受孔处气流旋流比不断减小,使接受孔元件的流通性增强;供气孔入口处旋流比逐渐增加至大于 1,供气孔入口流通性先增强后减弱;从而导致径向预旋系统无量纲质量流量趋于先增大后减小。

由图 10 可知,总压损失系数均随着 r_n/r_s 的增加而增加,随着旋转雷诺数的增加而降低。由于给定出口静压为固定值,则总压损失系数的变化取决于出口相对动压的变化。当 r_n/r_s 逐渐增加时,供气孔出口气流旋流比不断降低,即气流出

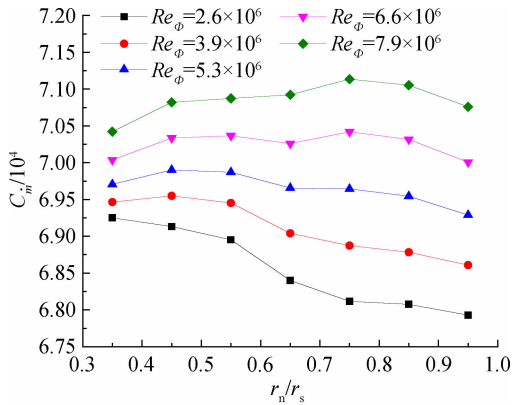


图 9 无量纲质量流量随进气位置的变化
Fig. 9 Dimensionless mass flow rate varying with air entraining position

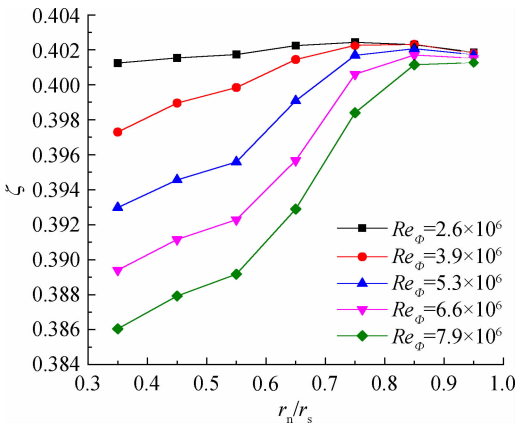


图 10 总压损失系数随进气位置的变化
Fig. 10 Total pressure loss coefficient varying with air entraining position

大。但进气位置较低时,共转腔内旋流比变化较大,随着旋转雷诺数的增加,壁面对盘腔内流体做功增加导致气流静温增加;而进气位置较高时,盘腔内气流旋流比变化则较小,壁面对流体做功导致的气流静温升较小。故不同进气位置下温降系数随旋转雷诺数的变化特性不同。在同一旋转雷诺数下,随着 r_n/r_s 的增加温降系数随之增加。这是因为当气流由共转腔径向外流时,进气位置越高气流径向外流距离越短,壁面对气流做功量也随之减少,气流静温升减小;供气孔出口气流旋流比也随着 r_n/r_s 的增加逐渐降低至为 1,气流的相对动温也减小,故温降系数不断提高。在 $Re_\phi = 7.9 \times 10^6$,盘腔进气位置 $r_n/r_s = 0.95$ 比 $r_n/r_s = 0.35$ 时温降系数增大 525%,比基准型增大 180.02%。

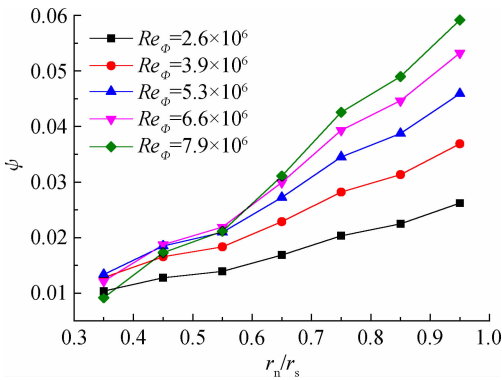


图 11 温降系数随进气位置的变化
Fig. 11 Temperature drop coefficient varying with air entraining position

口周向速度相对于当地线速度不断降低,从而导致相对动压降低,总压损失系数增大。而供气孔出口气流旋流比随着旋转雷诺数的增加不断增大,则相对总压增大,总压损失系数减小。当 $Re_\phi = 7.9 \times 10^6$,盘腔进气位置 $r_n/r_s = 0.95$ 比 $r_n/r_s = 0.35$ 时的总压损失系数增大 3.93%,比基准型增大 3.1%。

3.2 径向预旋系统温降特性

图 11 给出不同旋转雷诺数下,径向预旋系统温降特性随盘腔进气位置变化趋势图。由图可知,当盘腔进气位置较低时,随着旋转雷诺数的增大,径向预旋系统温降系数会先增加后降低。当盘腔进气位置较高时,径向预旋系统温降系数随着旋转雷诺数的增大而增大。由于无量纲质量流量均随着旋转雷诺数的增加而增加,则预旋喷嘴出口流速随之增大、静温随之降低。受上游的影响,径向预旋系统出口静温也降低,温降系数增

3.3 径向预旋系统熵增特性

图 12 给出径向预旋系统转动域内相对于系统进口比熵增分布云图,由图可知,在不同盘腔进气位置下熵增沿着气流流动的方向不断增加,且随着 r_n/r_s 的增大,径向预旋系统出口比熵增随之减小。本文计算模型为开口系绝热稳流系统,参考式(7)可知,系统内流体存在直接耗散以及湍流耗散,从而引起系统熵增。

图 13 给出径向预旋系统各元件出口截面气流周向速度与壁面周向速度差值沿程变化曲线。(图中 0、1、2、3、4、5 分别代表预旋喷嘴入口、预旋喷嘴出口、接受孔入口、接受孔出口、供气孔入口、供气孔出口。)由于预旋喷嘴为简单直孔型结构,且预旋喷嘴出口气流周向速度差最大,从而产生较高的耗散熵产率。当气流进入接受孔、共转腔、供气孔等旋转元件时,虽然气流在接受孔内周向速度变化较大,但接受孔径向长度较短,壁面对气

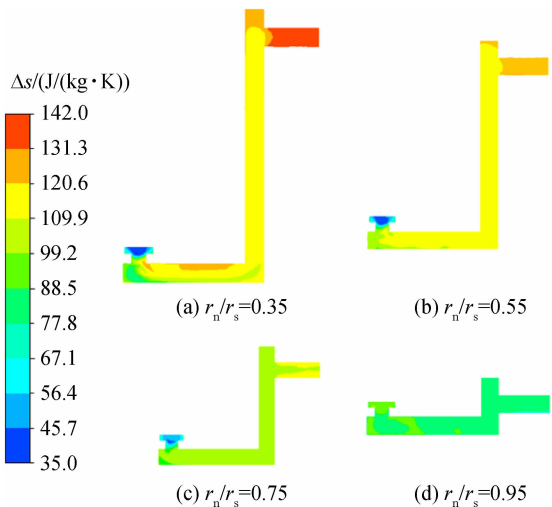


图 12 转动域内比熵增

Fig. 12 Specific entropy increment in the rotating cavity

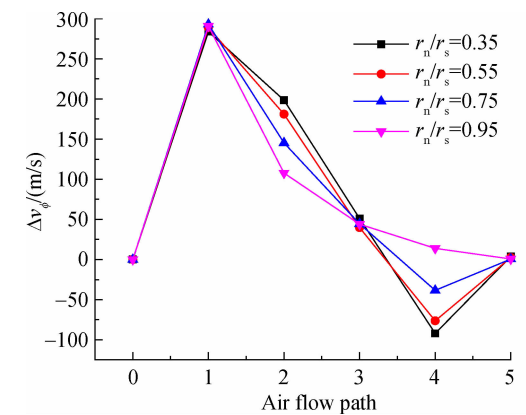


图 13 周向速度差沿程变化曲线

Fig. 13 Circumferential velocity difference along the flow path

流作用较弱,耗散熵产率较少。而气流进入共转腔后,气流流向发生多次改变,气流与转盘壁面存在强烈冲击、摩擦,从而产生很高的熵产率。

图 14 为 $Re_\phi = 6.6 \times 10^6$ 时不同盘腔进气位置下径向预旋系统内部各元部件比熵增所占系统总比熵增的比例的平均值。由图可以看出,共转腔、预旋喷嘴内部比熵增所占比例较大分别为 46% 和 36%;而接受孔、供气孔和预旋腔内比熵增占比较小,总和约占系统比熵增的 20%。

图 15 为 $Re_\phi = 6.6 \times 10^6$ 时不同盘腔进气位置下径向预旋系统内部各元部件比熵增所占系统总比熵增的比例的变化趋势。其中共转腔、供气孔内部比熵增占比均随着 r_n/r_s 的增加而降低;预旋喷嘴内部比熵增占比随着 r_n/r_s 的增加而升高;接受孔内部比熵增占比则随着 r_n/r_s 的增加先减小后增大;预旋腔内比熵增占比几乎不变。

这是因为随着 r_n/r_s 的增加,预旋喷嘴出口静压降低,气流流速增大,气流与壁面速度差增大,导致比熵增加;在进气位置较低时,气流与共转腔壁面周向速度差较大且气流在共转腔内部径向外流距离较长。随着 r_n/r_s 的增大,气流与共转腔壁面的周向速度差以及气流径向外流距离均减小,故共转腔内比熵增逐渐减小。由图 12 可知,接受孔及供气孔内部比熵增主要发生在入口处,随着 r_n/r_s 的提高,接受孔入口气流旋流比逐渐增大至大于 1,供气孔入口气流旋流比逐渐增加至 1,由于旋流比越接近 1,气流与壁面速度差越小,气流耗散熵产率越低,故接受孔内部比熵增先减小后增大,供气孔内部比熵增逐渐减小。

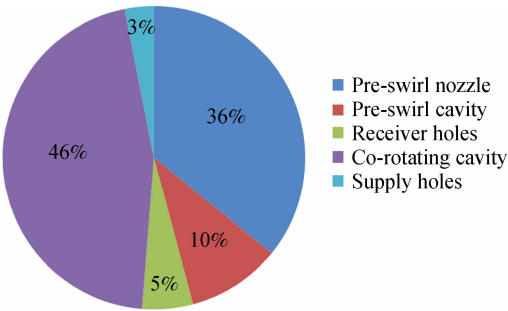


图 14 各结构比熵增占比

Fig. 14 Specific entropy increment proportion of each structure

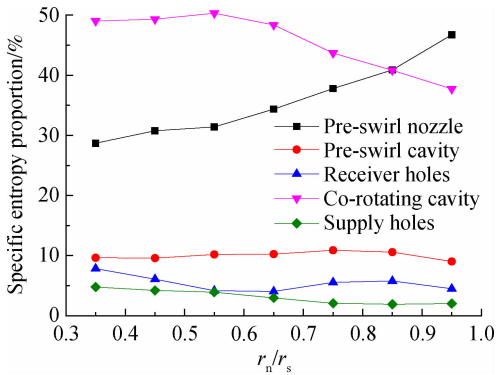


图 15 比熵增占比随进气位置的变化

Fig. 15 Specific entropy increment proportion of each structure varying with air entraining position

4 结 论

1) 随着盘腔进气位置的增加,在低雷诺数下,径向预旋系统无量纲质量流量随着盘腔进气位置的增加不断降低,在高雷诺数下随之先增大后减小。

2) 径向预旋系统总压损失系数和温降系数

均随着盘腔进气位置的增加而增大。在旋转雷诺数 $Re_\phi=7.9\times10^6$,随着盘腔进气位置的增加,总压损失系数增加 3.93%。温降系数最大可增加 525%。故在径向预旋系统压降允许范围内,适当增大盘腔进气位置,可有效提升系统温降。

3) 径向预旋系统中比熵增最大区域为共转腔内部,约占系统总熵增的 46%。气流与共转腔壁面速度差是引起系统熵增的主要原因。增大盘腔进气位置,可有效降低气流与壁面的周向速度差,从而降低径向预旋系统流动损失。

致谢

感谢国家两机重大科技专项给予的支持以及课题组成员的帮助。

参考文献:

[1] YAN Y,GORD M F,LOCK G D,et al. Fluid dynamics of a pre-swirl rotor-stator system[J]. Journal of Turbomachinery,2003,125(4):805-813.

[2] JARZOMBEK K,DOHME H J,BENRA F K,et al. Flow analysis in gas turbine pre-swirl cooling air systems:variation of geometric parameters[R]. ASME Paper 2006-GT-90445,2006.

[3] LEWIS P. Pre-swirl rotor-stator system: flow and heat transfer[D]. Bath,England:University of Bath,2008.

[4] LEWIS P,WILSON M,LOCK G,et al. Effect of radial location of nozzles on performance of pre-swirl systems[J]. Journal of Power and Energy,2009,223(2):179-190.

[5] JAVIYA U,CHEW J,HILLS N,et al. CFD analysis of flow and heat transfer in a direct transfer pre-swirl system [R]. ASME Paper 2010-GT-2296,2010.

[6] GRANOVSKIY A,KOSTEGE V,CHERNYSHEV S,et al. Impact of the pre-swirl nozzle location on the air transfer system characteristic[R]. ASME Paper 2009-GT-59355,2009.

[7] ELSADI H,GUEVREMONT G. CFD study of HPT blade cooling flow supply systems[R]. ASME Paper 2007-GT-27228,2007.

[8] 刘高文,张林,务卫涛,等. 长径比对预旋孔流动特性影响的数值研究[J]. 推进技术,2013,34(5):644-650.

LIU Gaowen,ZHANG Lin,WU Weitao,et al. Numerical simulations on the flow characteristics of the pre-swirl nozzles with different length-to-diameter ratios[J]. Journal of Propulsion Technology,2013,34(5):644-650. (in Chinese)

[9] 吴衡,冯青,刘高文,等. 熵分析法在盖板式预旋系统分析中的应用[J]. 推进技术,2016,37(11):2048-2054.

WU Heng,FENG Qing,LIU Gaowen,et al. Entropy analysis of a cover-plate preswirl system[J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(11):2048-2054. (in Chinese)

[10] 吴衡,刘高文,冯青,等. 盖板式预旋系统的压比和熵增特性[J]. 推进技术,2019,40(10):2252-2261.

WU Heng,LIU Gaowen,FENG Qing,et al. Pressure ratio and entropy increment in a cover-plate pre-swirl system [J]. Journal of Propulsion Technology,2019,40(10):2252-2261. (in Chinese)

[11] 胡伟学,王锁芳,毛莎莎. 预旋喷嘴径向角度对预旋特性影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2019,34(1):84-91.

HU Weixue,WANG Suofang,MAO Shasha. Numerical study on influence of pre-swirl nozzle radial angles on pre-swirl characteristic[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(1):84-91. (in Chinese)

[12] 王锁芳,朱强华,张羽,等. 预旋进气位置对转静盘腔换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1227-1232.

WANG Suofang,ZHU Qianghua,ZHANG Yu,et al. Numerical studies of heat transfer in a rotor-stator cavity with different radial positions of pre-swirl inlet[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(8):1227-1232. (in Chinese)

[13] 侯伟韬,王新军,李炎栋. 接收孔周向倾角对预旋转静盘腔流动特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2019,53(11):27-33.

HOU Weitao,WANG Xinjun,LI Yandong. Influence of the circumferential inclination of receiver holes on the flow characteristics of the pre-swirl rotor-stator cavity[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2019,53(11):27-33. (in Chinese)

[14] 林立,谭勤学,吴康. 低位预旋进气转静系盘腔流动特性研究[J]. 推进技术,2016,37(2):258-265.

LIN Li,TAN Qinxue,WU Kang. Study on the flow characteristics of the low-level pre-rotating air-injection system [J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(2):258-265. (in Chinese)

[15] 孙占东,罗翔,黄由之,等. 预旋结构影响带盖盘预旋系统流动的实验[J]. 推进技术,2017,38(8):1826-1832.

SUN Zhandong,LUO Xiang,HUANG Youzhi,et al. Experimental of flow of a cover-plate pre swirl system influenced by pre swirl structure[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(8):1826-1832. (in Chinese)

[16] 张建超,王锁芳. 径向预旋系统温降与流阻特性的数值研究[J]. 航空动力学报,2013,28(10):2284-2291.

ZHANG Jianchao,WANG Suofang. Numerical study on characteristics of temperature reduction and flow loss in radial pre-swirl system[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(10):2284-2291. (in Chinese)

[17] 余建军. 径向预旋流动特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

YU Jianjun. Investigation on the flow characteristics in radial pre-swirl system[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017. (in Chinese)

[18] KOCK F,HERWIG H. Entropy generation calculation for turbulent shear flows and their implementation in CFD codes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2005,26(4):672-680.